

Єсич Д.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лебедев Д.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖАХ НА БАЗІ СТАНДАРТІВ 802.11 В РАМКАХ СИМУЛЯТОРА NS3

Стаття присвячена розробці та реалізації програмного модуля для моделювання інтерференційних завад у бездротових мережах, що базуються на стандартах 802.11, у межах симулятора NS-3. У статті розкрито основні принципи моделювання завад, включно з аналізом фізичних та програмних аспектів взаємодії сигналів у бездротових мережах. Визначено ключові недоліки існуючих інструментів, таких як NS-3 та OMNeT++, зокрема складність налаштувань, відсутність динамічного управління параметрами завад і недостатня підтримка рандомізації параметрів завад. Запропоновано новий підхід, що спрямований на усунення цих обмежень через використання спеціалізованого скрипту, який структурує процес моделювання завад.

У статті детально розкрито функціональні можливості розробленого скрипту, що дозволяє інкапсулювати параметри завад у вигляді окремих класів. Такий підхід забезпечує спрощення процесу налаштування параметрів інтерференційних завад, зокрема цільності спектральної потужності, ширини спектра, кількості джерел завад, а також управління їхнім динамічним зміненням у реальному часі. Наведено приклади сценаріїв тестування, які демонструють коректність функціонування розробленого модуля за різних умов, зокрема динамічної зміни параметрів, впливу просторового розташування джерел завад та їхньої інтенсивності.

*У статті визначено, що розроблений програмний модуль дозволяє дослідникам детально аналізувати вплив інтерференційних завад на продуктивність мережі. Це включає оцінку параметрів каналу передачі даних, зокрема пропускну здатності, затримок та рівня втрат сигналу. Розроблений модуль значно спрощує тестування методів мінімізації та уникнення інтерференційних завад, таких як динамічний розподіл каналів, алгоритми планування частот та адаптації швидкості передачі даних. У статті запропоновано два основні класи, *MultipleInterferenceHelper* та *MultipleInterferenceNode*, які значно спрощують управління джерелами завад та їх інтеграцію в сценарії моделювання. Визначено, що використання цих класів дозволяє автоматизувати налаштування завад і забезпечує більшу гнучкість у налаштуванні сценаріїв симуляції.*

Запропонований модуль є потужним інструментом для розробки нових алгоритмів оптимізації радіоресурсів. Його використання дозволяє забезпечити більш реалістичне тестування бездротових систем у переважаних частотних діапазонах, що особливо актуально для мереж стандарту 802.11.

Ключові слова: безпроводні мережі, якість каналу передачі даних, інтерференція, моделювання інтерференційних завад, ефект загасання, стандарт 802.11, адаптація швидкості передачі, NS-3.

Постановка проблеми. Симуляція завад у бездротових мережах є складним завданням через багатогранність і динамічність деяких сценаріїв. Такі фактори, як різноманіття середовищ розповсюдження сигналів, мобільність вузлів мережі, а також спектральна вибірковість завад, суттєво ускладнюють моделювання. Інструменти симуляції завад, що надаються такими потужними мережевими симуляторами, як OMNeT++ [1] та NS-3

[2], мають високий рівень гнучкості. Водночас, їх налаштування є доволі складним завданням і вимагає значних до опрацювань для забезпечення реалістичності моделювання спектру. Це стосується як забезпечення смугового розподілу завад у частотному спектрі, так і динаміки змін потужності під час симуляції.

Постановка завдання. Демонстрація нового модуля в ns-3 для моделювання інтерференцій-

них завад для вирішення зазначених викликів у статті представлено скрипт, що демонструє приклад надбудови над наявними механізмами моделювання завад у симуляторі **ns-3**. Запропонований скрипт структурує процес налаштування параметрів завад, об'єднуючи їх в окремий клас, що забезпечує гнучкість і зручність у роботі. Скрипт дозволяє швидко та ефективно налаштовувати такі параметри джерел завад, як щільність спектральної потужності (PSD) [3], ширина спектра завад, і кількість джерел завад. Окрім того, у рамках скрипту реалізовано функціонал для динамічної зміни параметрів завад під час симуляції. Зокрема, передбачено можливість генерації випадкових значень PSD відповідно до нормального розподілу, що задається користувачем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Запропонований модуль підвищує ефективність налаштувань завад в симуляторі **ns-3** і значно спростить процес розробок у галузі бездротових мереж. Даний скрипт є гарним прикладом оптимізації налаштувань моделювання завад та дає змогу проводити детальне тестування методів зменшення завад в бездротових мережах на базі стандарту 80211 [4]. Зокрема таких як динамічний розподіл каналів і алгоритми планування каналів, алгоритмів динамічної зміни частотних каналів [5, 6, 7]. Цей інструмент надає дослідникам і інженерам мереж надійну платформу для оптимізації бездротових систем, і забезпечення кращого співіснування у перевантажених частотних діапазонах.

Огляд існуючих інструментів та методів моделювання завад. Моделювання завад є критично важливим компонентом симуляцій бездротових мереж, і для цього широко використовуються такі інструменти, як **ns-3**, **OMNeT++** та **QualNet**. Ці симулятори надають потужні платформи для проектування та аналізу бездротових систем зв'язку, включаючи можливість моделювання сценаріїв завад. Наприклад, **ns-3** має вбудовану підтримку моделювання спектру, що дозволяє користувачам симулювати завади за допомогою пристроїв, що враховують спектральні характеристики, і моделей втрат сигналу. Аналогічно, **OMNeT++** забезпечує детальне моделювання завад через розширення, такі як **INET** [8] і **SimuLTE** [9].

Попри ці можливості, традиційні інструменти часто вимагають значного ручного налаштування для реалізації сценаріїв завад. Це включає налаштування щільності спектральної потужності

(PSD), конфігурацію ширини каналу та управління частотно-часовою динамікою джерел завад.

Виклад основного матеріалу. Обмеження традиційних підходів. Хоча існуючі інструменти є потужними, вони мають низку обмежень при роботі з динамічними сценаріями завад:

- Складність налаштування. Створення реалістичних сценаріїв завад потребує глибоких знань базових фреймворків.

- Обмежена підтримка змін параметрів завад під час симуляції.

- Недостатня рандомізація. в рамках базового функціоналу моделювання завад немає механізмів для забезпечення випадкових змін завад.

Обґрунтування необхідності нового підходу до моделювання завад.

Виявлені обмеження підкреслюють необхідність створення більш гнучкого та зручного для користувача рішення для моделювання завад. Новий модуль має вирішити ці проблеми шляхом:

- Інкапсуляції параметрів завад. Надання спеціальних класів для спрощення конфігурації та управління джерелами завад та спрощення налаштування видів типових завад.

- Динамічної адаптації. Забезпечення можливості змінювати параметри завад під час симуляції.

- Ймовірнісного моделювання. Додавання підтримки рандомізації та ймовірнісних змін PSD.

- Зручності використання. Зменшення складності налаштування і часу на підготовку.

Запропонований модуль у **ns-3**, як описано у цій статті, покликаний усунути ці недоліки, за допомогою організації моделювання завад у цілісну структуру з розширеним функціоналом.

Архітектура модуля.

Модуль складається з двох основних класів: **MultipleInterferenceHelper** та **MultipleInterferenceNode**. По своїй суті клас **MultipleInterferenceNode** репрезентує заваду а **MultipleInterferenceHelper**, це допоміжний клас, який відповідає за алокацію **MultipleInterferenceNode**. Діаграма класів зображена на рисунку 1.

MultipleInterferenceHelper. Клас **MultipleInterferenceHelper** слугує головним інтерфейсом для управління усіма створеними завадами. Його основна роль полягає в алокації оновлень для вузлів завад.

Атрибути:

- **interferenceVector**: вектор, який зберігає всі створені вузли завад.

- **updatePeriod**: період між оновленнями стану завад.

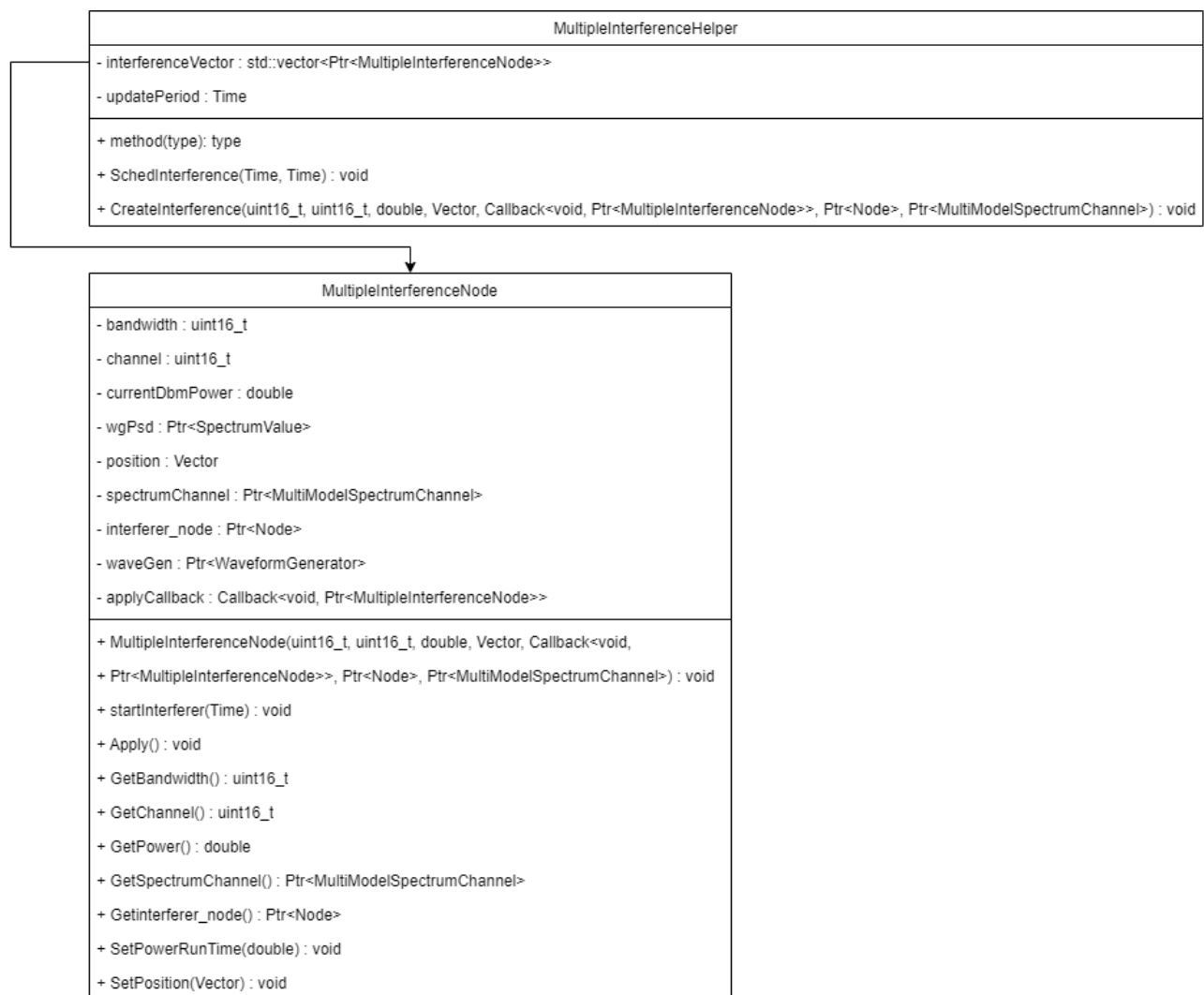


Рис. 1. Діаграма класів які є основою модуля

Методи:

- SchedInterference: задає параметри періодичних оновлення усіх вузлів завад в симуляції.
- CreateInterference: створює новий вузол завади з заданими параметрами та додає його до вектора interferenceVector.

MultipleInterferenceNode. Клас MultipleInterferenceNode представляє окреме джерело завад у симуляції. Він інкапсулює всі властивості та поведінки, пов'язані з джерелом завад.

Атрибути:

- bandwidth: ширина смуги частот джерела завади.
- channel: номер каналу, на якому працює вузол завади.
- currentDbmPower: поточна потужність джерела завади в дБм.
- wgPsd: спектральна щільність потужності (Power Spectral Density) для генератора сигналу.

- position: тривимірний вектор, що описує позицію вузла.

- spectrumChannel: об'єкт, що представляє канал розповсюдження сигналу.

- interferer_node: вузол, до якого належить джерело завади.

- waveGen: об'єкт генератора сигналів, пов'язаний із вузлом завади.

- applyCallback: функція, яка викликається для застосування змін до параметрів джерела завади.

Методи:

- MultipleInterferenceNode: конструктор, який ініціалізує вузол завади з заданими параметрами.

- startInterferer: запускає вузол завади із затримкою у часі.

- Apply: застосовує зареєстровану функцію для оновлення параметрів вузла завади.

- GetBandwidth: повертає ширину смуги частот вузла завади.

- GetChannel: повертає номер каналу вузла завади.
- GetPower: повертає поточну потужність вузла завади.
- GetPosition: повертає координати позиції вузла завади.
- GetSpectrumChannel: повертає канал, через який передається сигнал вузлом завади.
- Getinterferer_node: повертає вузол, до якого прив'язане джерело завади.
- SetPowerRunTime: змінює потужність джерела завади під час виконання симуляції.
- SetPosition: встановлює нову позицію вузла завади.

Взаємозв'язки компонентів. Клас MultipleInterferenceHelper виконує роль центрального контролера, який координує створення та управління кількома екземплярами MultipleInterferenceNode. Використання зареєстрованих функцій для оновлення параметрів вузлу завади під час симуляції надає механізм для динамічної поведінки під час виконання, забезпечуючи можливість зміни параметрів вузлу.

Опис структури скрипту.

Для перевірки функціоналу створеного модулю, необхідно налаштувати симуляцію міні-

мальної безпроводової мережі, на базі стандартів 80211 [1], структуру створеного скрипту для тестування модулю зображено на рисунку 2.

Станція та Точка доступу. Ці елементи представляють бездротові вузли в мережі.

Модель частотного спектру. Ця модель симулює розподіл та використання частотних каналів для зв'язку.

Модель розповсюдження радіо сигналу в просторі. Симулює поширення радіохвиль у фізичному середовищі. Це важливо для визначення впливу відстані та перешкод на потужність і якість сигналу.

Модель розташування елементів мережі в просторі. Ця модель визначає просторове розташування вузлів в рамках симуляції.

Модель методів доступу до каналу передачі даних. Симулює стандарт 80211n, та протоколи для спільного використання каналу передачі.

Модель адаптації швидкості передачі даних. Регулює швидкість передачі залежно від поточних умов каналу та якості сигналу

Модель мережевого інтерфейсу. Представляє апаратний і програмний інтерфейс, що використовується для передачі та прийому даних у мережі.

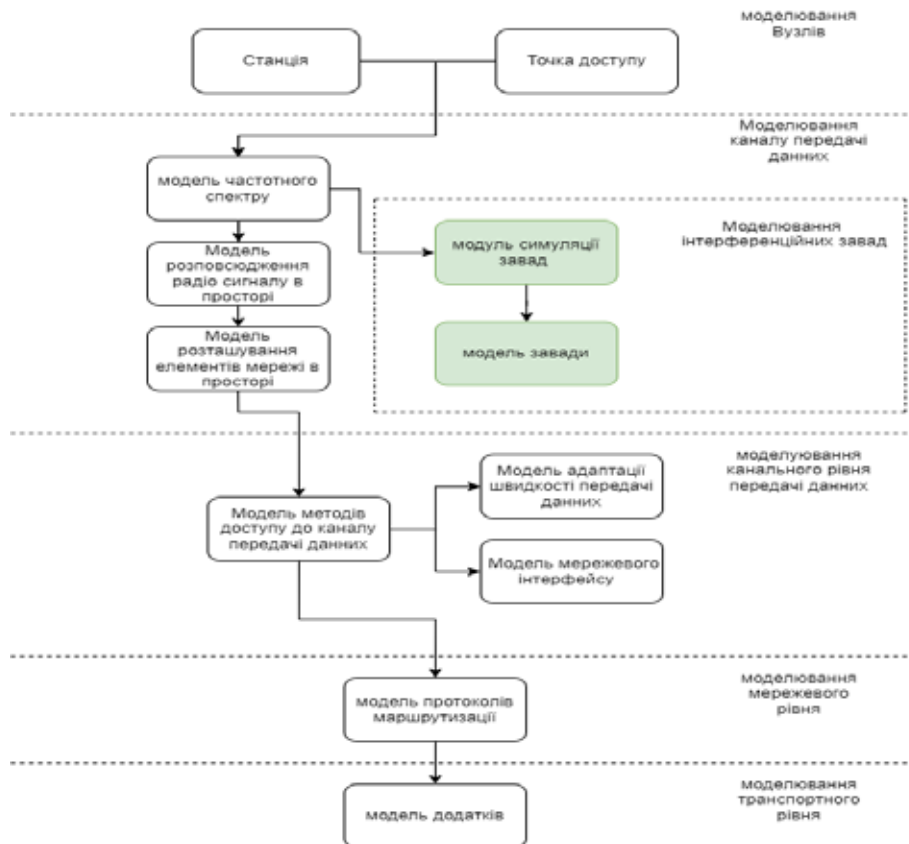


Рис. 2. Структура скрипту створеного для тестування програмного модулю для симуляції інтерференційних завад

Модель протоколів маршрутизації. Симулює протоколи, які використовуються для маршрутизації даних у мережі.

Модель додатків. Представляє генерацію трафіку та комунікацію на рівні додатків.

Ця діаграма демонструє, як симуляція інтегрує ці моделі для тестування та аналізу поведінки бездротової мережі за різних умов із сильним акцентом на інтерференцію та динаміку каналів.

Демонстрація роботи скрипту.

Для демонстрації роботи скрипту прийнято рішення симулювати деякі сценарії роботи програмного модулю для генерації інтерференційних завад. Статистика якості каналу передачі даних, збиратиметься на вузлі базової станції. Демонстрація роботи змодельованої мережі без завад рисунок 3.

При моделюванні дистанція між вузлами була встановлена на 2 метри, а потужність випромінювання – на рівні 17 дБм. У результаті тестування можна спостерігати, що налаштування симуляції виконано коректно. Пропускна здатність каналу передачі даних відповідає найвищому можливому показнику для ширини каналу 20 МГц з втратами на рівні 20%, що є нормою для втрат при розповсюдженні сигналу в просторі.

Демонстрація впливу налаштованої завади на якість передачі сигналу без впливу моделі розташування мережі, та моделі просторового розповсюдження на заваду рисунок 4.

В рамках даного сценарію, при моделюванні інтерференційної завади, модель розповсюдження

завади в просторі не використано. Це зроблено для демонстрації працездатності налаштувань потужності завади. Без урахування розповсюдження завади, потужність сигналу завади на приймачах дорівнює потужності випромінювання завади без врахування дистанції між генератором завади та вузлами мережі. У результаті демонстрації видно, що зконфігуровану потужність коректно відображено як рівень шуму на вузлі базової станції.

Демонстрація сценарію створення завади яка змінює своє значення під час симуляції згідно виставлених параметрів. Для демонстрації даного сценарію, початковий рівень потужності випромінювання завади виставлений в -75 дБм, для подальших змін завади в часі налаштовано адаптацію потужності з використанням нормального випадкового розподілу. Параметри генератора випадкових чисел наступні: середнє значення -75 дБм, стандартне відхилення 5 дБм. Результати симуляції можна спостерігати на рисунку.

Запуск симуляції з вище зазначеним параметрами, зображено на рисунку 5.

Зміна параметрів завади згідно встановленим параметрам генератору випадкових чисел.

У процесі симуляції було продемонстровано динамічну зміну потужності інтерференційної завади згідно з заданими параметрами. Початковий рівень потужності випромінювання завади складав -75 дБм. У подальшому, значення потужності змінилось під час симуляції за допомогою генератора випадкових чисел із нормальним.

```
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopping.cc
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +1e+10ns; TxPower: 17dBm
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
        57      81226      -35.7864      -93.966      58.1795        36      20MHz
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$
```

Рис. 3. Демонстрація результатів симуляції першого сценарію використання

```
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopping.cc
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +1e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 5e-18 integrated DbmPower: 1e-10
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -70 at location: (0, 0, 0)
Scheduling interference update to start at: 0.002 seconds, with a period of: 0 seconds.
Starting interferer on channel 36 with current DbmPower: -70
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
  Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB)      Chan      BW
        52      74804      -35.7864      -70.0165      34.2301        36      20MHz
dmytro@LAPTOP-FQFV6I1L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$
```

Рис. 4. Демонстрація результатів симуляції другого сценарію використання

```

dmytro@LAPTOP-FQV611L:~/projects/ns3_simulator/workspace/ns-allinone-3.43/ns-3.43$ ./ns3 run scratch/channel_hopp
[0/2] Re-checking globbed directories...
[2/2] Linking CXX executable ../build/scratch/ns3.43-channel_hopping-debug
InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +2e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 1.58114e-18 integrated DbmPower: 3.16228e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -75 at location: (0, 0, 0)
Scheduling interference update to start at: 0.002 seconds, with a period of: 4 seconds.
Starting interferer on channel 36 with current DbmPower: -75
the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36

```

Рис. 5. Демонстрація запуску скрипту в рамках сценарію 3

```

Updating all interferers...
Applying changes to interferer on channel: 36 with current DbmPower: -75
Applying callback for interferer on channel: 36 with DbmPower: -75
Setting DbmPower of interferer on channel: 36 to: -73.8405
The current average noise is -74.9789dBm changing the noise generator power
Interference update rescheduled with period: 4 seconds.

```

Рис. 6. Демонстрація зміни параметрів завади

```

InterferenceHelper instance created.
wifiType: ns3::SpectrumWifiPhy distance: 2m; time: +2.2e+10ns; TxPower: 17dBm
wgPsd : 5e-18 integrated DbmPower: 1e-10
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 36, DbmPower: -70 at location: (0, 0, 0)
wgPsd : 1.58114e-18 integrated DbmPower: 3.16228e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 40, DbmPower: -75 at location: (0, 0, 0)
wgPsd : 5e-19 integrated DbmPower: 1e-11
Interferer instance created with bandwidth: 20, channel: 44, DbmPower: -80 at location: (0, 0, 0)

```

Рис. 7. Демонстрація алокації усіх каналів

```

the current average noise is 0 changing the channel to 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 36
Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB) Chan BW
50 52271 -35.7864 -70.8165 34.2301 36 20MHz
the current average noise is -70.8165 changing the channel to 44
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 44
Changed channel on 03-06-00:00:00:00:01 to: 44
Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB) Chan BW
53 103457 -35.7864 -79.7592 43.9727 44 20MHz

```

Рис. 8. Демонстрація зміни каналу

```

changed channel on 03-06-00:00:00:00:02 to: 36
Tput (Mb/s) Received Signal (dBm) Noise (dBm) SNR (dB) Chan BW
52 74804 -35.7864 -65.7927 30.0063 36 20MHz

```

Рис. 9. Демонстрація результату симуляції четвертого сценарію використання

В рамках даного сценарію створено дві окремих завад які розташовані на наступних частотних каналах: 36, 40, 44 та мають відповідні значення потужності випромінювання сигналу завад -70 -80, результат симуляції зображено на рисунках 7 та 8.

Результати симуляції демонструють коректність роботи налаштувань завад: на кожному з частотних каналів рівень шуму на вузлах мережі відповідає заданим параметрам потужності випромінювання.

Демонстрація впливу розташування джерела інтерференційних завад на рівень шуму при отриманні

сигналу базовою станцією. В рамках даного сценарію джерело завад додано до моделі просторового розповсюдження сигналу. Результати симуляції зображено на рисунку 9.

Результати симуляції демонструють, що додавання джерела інтерференційної завади до моделі просторового розповсюдження сигналу впливає на рівень шуму, що отримує базова станція. Адже потужність завади не відповідає рівню шуму який отримує базова станція.

Висновки. У процесі дослідження розроблено програмний модуль для моделювання інтерференційних завад у бездротових мережах

на основі стандарту 802.11, інтегрований у симулятор NS-3. Представлені сценарії моделювання підтвердили коректність роботи модуля за різних умов, таких як:

- Динамічна зміна параметрів завад.
- Моделювання декількох джерел завад.

– Вплив просторового розташування джерел завад.

Таким чином, запропонований модуль є ефективним інструментом для моделювання завад, аналізу їх впливу на продуктивність мережі, а також для тестування нових алгоритмів оптимізації радіоресурсів.

Список літератури:

1. Introduction to OMNeT++ [Електронний ресурс] OMNeT++ : офіційний сайт. Режим доступу: <https://omnetpp.org/intro/>
2. About ns-3 [Електронний ресурс]. ns-3 : офіційний сайт. Режим доступу: <https://www.nsnam.org/about/>
3. Spectrum Model in ns-3 [Електронний ресурс] ns-3 : документація. Режим доступу: <https://surl.li/cnhqqs>
4. Wi-Fi Overview: 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements [Електронний ресурс]. Tektronix: офіційний ресурс. Режим доступу: <https://surl.li/ckqcss>
5. Метод ефективного динамічного розподілення каналів між голосовими викликами та даними [Електронний ресурс]. КРІ : журнал. Режим доступу: <https://elc.kpi.ua/old/article/view/35539>
6. Вузловий підхід щодо каналів розподілу [Електронний ресурс]. КРІ : журнал. Режим доступу: <https://surl.li/adfanq>
7. Особливості формування каналів розподілу [Електронний ресурс]. Львівська політехніка : журнал. Режим доступу: <https://surl.li/wohuqv>
8. INET Framework Introduction [Електронний ресурс]. OMNeT++ : офіційний сайт. Режим доступу: <https://inet.omnetpp.org/Introduction.html>
9. SimuLTE for OMNeT++ [Електронний ресурс]. SimuLTE : офіційний сайт. Режим доступу: <https://simulte.omnetpp.org/>

Yesych D.V., Lebedev D.Yu. IMPLEMENTATION OF A SOFTWARE MODULE FOR MODELING INTERFERENCE IN WIRELESS NETWORKS BASED ON 802.11 STANDARDS WITHIN THE NS-3 SIMULATOR

The article is devoted to the development and implementation of a software module for modeling interference in wireless networks based on 802.11 standards within the NS-3 simulator. The article reveals the main principles of interference modeling, including the analysis of physical and software aspects of signal interaction in wireless networks. Key shortcomings of existing tools, such as NS-3 and OMNeT++, have been identified, including the complexity of configuration, the lack of dynamic management of interference parameters, and insufficient support for randomization of interference parameters. A new approach is proposed to address these limitations by using a specialized script that structures the process of interference modeling.

The article provides a detailed description of the functional capabilities of the developed script, which allows encapsulating interference parameters into separate classes. This approach simplifies the configuration of interference parameters, including spectral power density, spectrum width, the number of interference sources, and their dynamic adjustment in real-time. Examples of test scenarios are presented, demonstrating the module's correct operation under various conditions, such as dynamic parameter changes, the impact of spatial positioning of interference sources, and their intensity.

*The article establishes that the developed software module enables researchers to thoroughly analyze the impact of interference on network performance. This includes evaluating data transmission channel parameters, such as throughput, delays, and signal loss levels. The developed module significantly simplifies the testing of methods for minimizing and avoiding interference, such as dynamic channel allocation, frequency planning algorithms, and transmission rate adaptation. Two main classes, *MultipleInterferenceHelper* and *MultipleInterferenceNode*, are proposed in the article, which significantly simplify the management of interference sources and their integration into simulation scenarios. It is determined that using these classes allows for the automation of interference configuration and provides greater flexibility in the setup of simulation scenarios.*

The proposed module is a powerful tool for developing new algorithms for radio resource optimization. Its use enables more realistic testing of wireless systems in overloaded frequency bands, which is particularly relevant for networks based on the 802.11 standard.

Key words: wireless networks, data transmission channel quality, interference, interference modeling, attenuation effect, 802.11 standard, transmission rate adaptation, NS-3.